基于单极感应问题的力线与场概念的实验研究

张学亮[1]

[1]（芜湖职业技术学院电气与自动化学院 安徽芜湖 241000）

摘要：本文通过线圈与磁体相对运动实验，以及对诸多电磁相互作用案例分析研究表明在单极感应问题上，韦伯当年的观点是正确的。另外，本文的实验分析同时表明与场的概念相比较，力线的概念对解释电磁相互作用同样起重要作用。

关键词：电磁感应定律；电磁相互作用；电磁场；磁力线；电力线；电磁波；洛伦茨力

分类号：O441

An Experimental Study on the Concept of Magnetic Field and Magnetic Field Line for Unipolar Induction

Zhang Xueliang

(Institute of Electrical and Automation, Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241000, China)

Abstract: This paper conducts electromagnetic induction experiments involving relative motion of coils and magnets, and analyses multiple cases of electromagnetic interactions. Both experimental results and analysis indicate the correctness of Weber's hypothesis on the unipolar induction problem. Moreover, it is demonstrated that compared to the concept of magnetic field, the concept of magnetic field line is equally useful and important in explaining electromagnetic interactions.

Keywords: Electromagnetic Induction; Electromagnetic Interaction; Electromagnetic field; Magnetic Field Lines; Electric Field Lines; Electromagnetic Waves; Lorentz Force

1 引言

磁体靠近导体运动时，为什么会在导体中感应电动势？根据法拉第电磁感应定律，是因为闭合回路中有磁通量的变化。麦克斯韦引申了法拉第电磁感应定律，认为运动着的磁体周围空间分布着涡旋电场。他坚持的观点：在磁场强度随时间发生变化的空间所有各点上，都有电场产生，而不论在这些点上是否有导体存在。爱因斯坦不仅认可这一观点，而且这一观点对于他狭义相对论思想的形成有着巨大的影响。在≪论动体的电动力学≫论文开篇，他就写到“大家知道，麦克斯韦电动力学应用到运动物体上时，就要引起一些不对称，——比如设想一个磁体同一个导体之间的电动力的相互作用。在这里，可观察到的现象只同导体和磁体的相对运动有关，可是按照通常的看法，这两个物体之中，究竟是这个在运动，还是那个在运动，却是截然不同的两回事。如果是磁体在运动，导体静止着，那么在磁体附近就会出现一个具有一定能量的电场，它在导体各部分所在的地方产生一股电流。但是如果磁体是静止的，而导体在运动，那么磁体附近就没有电场，可是在导体中却有一电动势，这种电动势本身虽然并不相当于能量，但是它——假定这里所考虑的两种情况中的相对运动是相等的——却会引起电流，这种电流的大小和路线都同前一情况中由电力所产生的一样。”

运动磁体附近导体中的感应电动势的原因究竟是什么？现在让我们顺着爱因斯坦的设想，真正做一次实验验证一下。实验导电磁体为圆柱形。导体为三个长度相同，内、外径不同的空心线圈L_1、L_2、L_3。取L_1的内径稍大于圆柱形磁体的直径，L_2的内径稍大于L_1的外径，L_3的内径稍大于L_2的外径。三个线圈一个套一个、端部平齐、同轴安放。在轴线方向上三个线圈以及圆柱形磁体彼此之间都可以相对运动。每个线圈各自连接电流计 G 构成闭合回路。实验原理见图 1。实验过程中保持线圈轴线与磁体轴线在同一条直线上。实验步骤与实验观察结果如下：

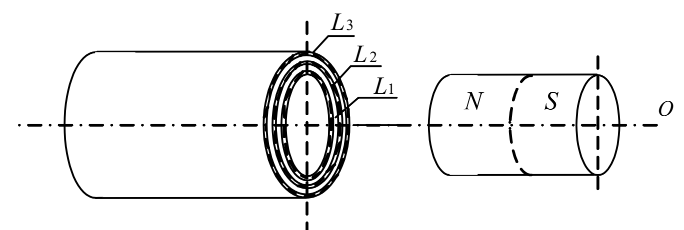


图 1 圆柱形磁体与三个套叠在一起的线圈电磁感应实验示意图

Figure 1: Electromagnetic induction experiment with a cylindrical magnet and three nested coils

1.1 三个线圈都静止，磁体运动，或磁体静止，三个线圈同步运动。当磁体（三个线圈同步）以一定速度作靠近或远离线圈（磁体）运动时，连接三个线圈的电流计指针基本上按同一规律摆动，说明三个线圈中均有电动势产生。

1.2 中间的线圈L_2静止，当内外侧线圈L_1和L_3与磁体同步作相对于线圈L_2的前后运动时，线圈L_2中产生电动势，线圈L_1与L_3中没有电动势产生。

1.3 线圈L_1和L_3静止，当中间线圈L_2与磁体同步作相对于线圈L_1和L_3的前后运动时，线圈L_1和L_3中产生电动势，线圈L_2中没有电动势产生。

（附加说明：当空心线圈匝数比较多，磁体磁性比较强时，随磁体同步运动的线圈中可能会观察到微弱电流，该电流是由于静止的线圈中有电流流过，再通过变压器耦合方式产生的干扰信号。确定是否是变压器耦合的干扰信号很容易，只要将静止的线圈开路就可验证。）

对于实验步骤 1.1 的观察结果，可分别采用法拉第电磁感应定律和洛伦茨力定律给出解释，没有什么异议，这里就不作过多分析。

实验步骤 1.2 与 1.3 的观察结果是：磁体运动时，与磁体有相对运动的静止线圈中会感应电动势，与磁体同步运动的线圈中没有感应电动势。注意这里静止的线圈和与磁体同步运动的线圈几乎是处于相同的空间。依据麦克斯韦与爱因斯坦的观点，静止线圈中感应电动势，是因为运动磁体引起磁通变化（时变磁场），导致磁体周围空间产生涡旋电场的原因。可是涡旋电场在一定范围内的分布应该是连续、弥散的。因此，对于实验步骤 1.2，电场只存在于静止的L_2所在的空间，而位于它的内、外侧随磁体同步运动的L_1、L_3处却没有电场；对于实验步骤 1.3，电场只存在于静止的L_1与L_3所在空间，而夹在它们中间随磁体同步运动的L_2所在位置却没有电场，这显然是说不通的。更何况三个线圈都静止，只有磁体在原位置作相同的运动时，三个线圈中都会有电动势产生。如果运动磁体周围空间确实存在涡旋电场，那么唯一可能的解释，就是随磁体同步运动的线圈中还存在着另一个抵消的电动势存在。产生这个抵消的电动势是有依据的。依照法拉第的观点，运动磁体的磁力线是静止的，不随磁体运动。所以依照这一观点，随圆柱形磁体在轴线方向同步运动的线圈会切割静止的磁力线，在线圈中感应电动势，该电动势与涡旋电场产生的电动势总是数值大小相等、方向相反，因此完全抵消。如果说这种解释成立，那么问题就又变成了磁体的磁力线是否随磁体运动的单极感应问题了。

笔者针对单极感应问题的验证实验已经给出了结论：磁体运动会带动磁力线[2][3][4]。在此不妨顺便再简要的验证一下单极感应问题。单独将上面实验的圆柱形导电磁体由原来沿轴线方向的前后运动方式改为沿转轴中线的单向恒速旋转运动。当用导线通过滑动触点与旋转磁体表面相应位置接触构成闭合回路时，回路中就会有直流电流流过，说明回路中有直流感应电动势产生。这就是法拉第与韦伯当年的单极感应实验。韦伯的观点是磁力线随磁体运动，是相对于实验室静止的导线切割磁力线，感应了直流电动势。法拉第的观点正相反，认为是旋转磁体上的导体切割静止的磁力线，感应了电动势，旋转的圆柱形导电

磁体这时变成了一个直流电源。现在再回到线圈与磁体的相对运动实验。当圆柱形磁体与线圈同步在轴线方向上作前后运动时，如果依照法拉第磁力线静止的观点，再结合图 2 给出的圆柱形磁体外围磁力线分布状况进行判别的话，与磁体同步运动的线圈应该会切割磁力线感应电动势，抵消前面说的由涡旋电场产生的电动势。假设这种解释成立，那么同样是依照法拉第的观点，导电的圆柱形磁体在轴线方向上作前后运动时，磁体上的导体也应该会切割磁力线，在磁体中环绕转轴的圆周方向上感应交变电动势。但是众所周知，磁体内部的磁通量或磁场强度不会随磁体运动而变化，根据法拉第电磁感应定律或麦克斯韦的观点，运动磁体内部不会产生涡旋电场，因此不会产生涡旋电场导致的电动势，因此磁体中由切割磁力线感应的电动势不会被抵消，磁体中应该会有涡流产生。当磁体以较高频率运动一段时间后，应该会有明显的温升。而实际上磁体并没有温升，说明磁体中并没有涡流、并没有感应电动势存在。（也可以在磁体上绕线圈直接观察加以证明。）也说明随磁体同步运动的线圈中并不存在线圈切割静止磁力线产生抵消的电动势，也因此说明线圈中由涡旋电场导致的电动势并不存在。这也进一步肯定了磁力线随磁体运动的验证结论。

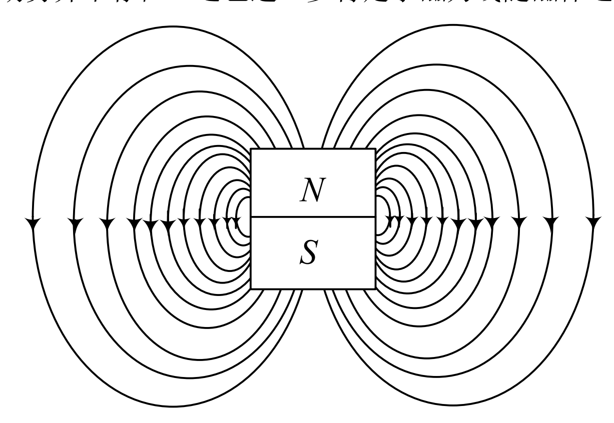


图 2 圆柱形磁体沿转轴中线剖面的磁体外围磁力线分布示意图

Fig. 2 The section view of the magnetic field line distribution around the cylindrical magnet (cut open along the rotation axis)

顺便说明一下，在单极感应实验状态，依照法拉第的观点推演，恒速旋转的圆柱形导电磁体上即使有感应直流电动势，但电动势的方向分布类似于电池，自身不能构成电流回路，需要通过滑动触点与静止的导线连接构成闭合回路，才能产生电流。所以说单极感应状态磁体长时间旋转不会有升温能说得过去。(有关单极感应电动势的产生问题文献[4]已作详细分析，这里就不多述。)但是，圆柱形磁体在作沿轴线方向的前后运动时情况就不同了，如果磁体上导体的确切割磁力线感应电动势，那么电动势的方向应该是环绕轴线涡旋的，所以应该产生涡流。而实验表明并没有涡流产生。

如果我们采纳磁力线随磁体运动的结论，再用基于这一结论的洛伦茨定律对上面的实验观察结果进行分析解释，看看结果如何。结合图 2 磁体的磁力线分布状况可以看出，只要线圈与磁体（磁力线的垂直分量）之间有相对运动，就存在线圈切割磁力线的相互作用，线圈中就会感应电动势。否则，不会感应电动势。实验步骤 1.2 与 1.3 中随磁体同步运动的线圈与磁体的磁力线之间没有相对运动，没有切割磁力线，因此线圈中不会感应电动势。至于是磁体运动、线圈静止，还是线圈运动、磁体静止，就感应电动势这一点来说其实是一回事，关键是磁体与线圈之间是否存在相对运动。这与爱因斯坦设想的完全不同，而且也不会出现爱因斯坦所说的电磁相互作用不对称的问题。

综上，无论是麦克斯韦的变化磁场产生涡旋电场的观点还是法拉第的电磁感应定律，都无法对上面的实验给出令人满意的解释。而基于磁力线随磁体运动的洛伦茨定律，却能够轻松、自然的给出合理的解释。这是否说明法拉第电磁感应定律其实并没有完美反映电磁相互作用的本质？

2　假设拓展的洛伦茨力及其电磁波

若接受磁力线随磁体运动的结论，再结合洛伦茨定律，形成一个基于磁力线随磁体运动的洛伦茨力（定律）。当运用这个新的洛伦茨定律观点对众多电磁相互作用案例进行考察分析后，就会发觉新的洛伦茨定律几乎对遇到的所有案例都可以给出自然、合理的解释。这是法拉第电磁感应定律与其他的观点是无法做到的。这说明导致电磁感应或电磁相互作用的真正原因并不是法拉第电磁感应定律描述的磁通量的变化，而应该是电荷与磁力线之间的相对运动。因此本文将基于磁力线随磁体运动的新洛伦茨定律称为拓展的洛伦茨力（定律）。拓展的洛伦茨力定义为：电荷在与磁力线（磁场 B）垂直分量之间相对运动时所受的力。不论是电荷相对于磁力线的运动，还是磁力线相对于电荷的运动，就电磁相互作用的效果来说两者是等效的。拓展的洛伦茨力 F 的表达式与原来的洛伦茨力相同：

$$F = qvBsin\,\alpha \qquad (1)$$

式中的 v 是电荷 q 与磁感应强度 B（磁力线）之间的相对速度；α为电荷 q 运动方向与磁感应强度 B 方向的夹角。感应电动势 E 的表达式也不变：

$$E = \int_0^l (V \times B) \cdot dl \qquad (2)$$

式中 V 是线段导体 l 与磁力线（磁感应强度 B）之间的相对速度。

依据拓展的洛伦茨力，在静止的磁场中，运动电荷所受的作用力就是原来的洛伦茨力。在运动的磁场中，静止的电荷同样会受到作用力；运动电荷在运动的磁场中同时承受的是两种力：一种是运动电荷在磁场中所受的原来的洛伦茨力，另一种是由于磁场的运动产生的力。通常这两种力并不在同一个方向上。电荷所受的拓展的洛伦茨力方向以及感应电动势方向判别可沿用传统方法不变。

拓展的洛伦茨力虽然是基于磁体的磁力线随磁体运动这一实验结论提出的，除了适用于磁体分子电流建立的磁力线，也应该适用于电荷的其他运动方式建立的磁力线。在电场作用下的匀速运动电荷或稳恒电流激发产生的是静磁场，匀速运动电荷或稳恒电流并不带动环绕着电荷或电流的磁力线一起向前运动，磁力线是静止的，否则人们将无法获得静磁场。但移动载流导线、移动电磁铁与移动磁体一样可以带动磁力线。因此拓展的洛伦茨力同样适用于由电磁铁与导体之间相对运动导致的电磁相互作用。电场作用下的加速运动电荷或变化的电流会激发电磁波。电磁波的运动方向与电荷运动方向是垂直的。构成电磁波的磁力线和电力线是运动的，运动方向与电荷运动方向相垂直。拓展的洛伦茨力应该同样适用于电磁波的电磁相互作用。

基于拓展的洛伦茨力观点，其电磁波的产生与传播机理与麦克斯韦的电磁波是不同的。假设真空中存在着能够传播电磁波的介质，该介质可与电荷相互作用，在正负电荷之间建立的是电力线；在电场或磁场作用下，运动电荷会以自身运动轨迹为轴线，产生由闭合磁力线构成的环绕自身磁场，闭合磁力线的平面与电荷运动方向垂直。如果电荷是匀速运动（稳恒电流），则产生的磁力线（磁场）是静止的，电荷附近的磁场强度可参考毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律或毕奥-萨伐尔公式大致确定。如果是变化的电场或变化电场导致电荷加速运动（变化电流），则会产生疏密变化的电力线或磁力线，疏密变化的电力线与磁力线会像纵波介质那样振动，并以光速在与电力线垂直的方向或电荷运动垂直的方向上向外传播，形成电磁波。已知毕奥-萨伐尔直线电流的磁场公式：

$$B= k\frac{I}{r} \qquad (3)$$

将上式两边各乘以$2\pi r$得安培磁环流定律公式：

$$2\pi rB = 2\pi kI \qquad (4)$$

上两式中 k 为常数。乘积$2\pi rB$称为磁感应强度 B 的环流。由（3）与（4）式可知，直流电流会产生环绕载流导线的闭合磁力线（磁场 B）；距离导线 r 点处的磁感应强度 B（磁力线密度）正比于导线中流过的电流 I，反比于距离 r，环绕导线分布的磁力线距离导线越近，密度越大，也就是磁感应强度 B 越大；反之亦然。电流越大磁力线延展分布的范围也越大。显然相距通电导线 r 处的磁力线不是凭空突然建立的。根据同向磁力线相斥的原理，不难想象环绕导线的磁力线由紧贴着导线的位置开始，随着导线中电流由零开始逐渐增大、密度也逐渐增大并逐渐向外扩展。反之，随着导线电流逐渐减小，磁力线密度逐渐变稀而向导线方向收缩。导线外围的磁力线会随着导线中电流的增减而变化，在垂直于电流的方向上扩展与收缩。如果导线中的电流方向变反，磁力线的方向也会跟着变向，但磁力线的扩展与收缩随电流增与减的变化规律不变。假定（3）、（4）两式也同样适用于变化的电流（加速运

动的电荷），那么当导线中流过的是周期性交变电流，如正弦波电流时，磁力线就会在与电流垂直的方向上如纵波介质那样振动起来，形成电磁波中的磁力线波，并以光速向外传播。不过由于是非张开的闭路导线，这种结构电路的磁力线波传播距离是非常有限的。

平板电容充放电时，变化的充放电电流除了会在充放电导线周围产生振动的磁力线波外，在电容两极板之间变化电场（也就是麦克斯韦的位移电流）的外围空间也同样会产生振动的磁力线波。此外，电容两极板之间电力线（电场）的建立、增减过程与磁力线的建立、增减过程相似。充电时，随着极板上电荷的逐渐增加，极板间的电力线密度也逐渐增加；放电时，随着极板上电荷逐渐减少，极板间的电力线密度也逐渐变稀。电力线的箭头方向是正电荷聚集的极板指向负电荷聚集的极板。反向充放电时情况亦然。如果充放电的激励电源为周期性交流电源，则极板间的电力线也会振动起来。当电容极板的结构形状合适时，振动的电力线就会以光速向空间传播，形成电磁波中的电力线波。就是说变化的电场（位移电流）既形成磁力线波也形成电力线波。如将连接极板的导线如图 3 所示移至电容的一侧，极板的内侧尽可能的向空间展开，则由电力线波与磁力线波构成的电磁波会更加容易向空间传播。

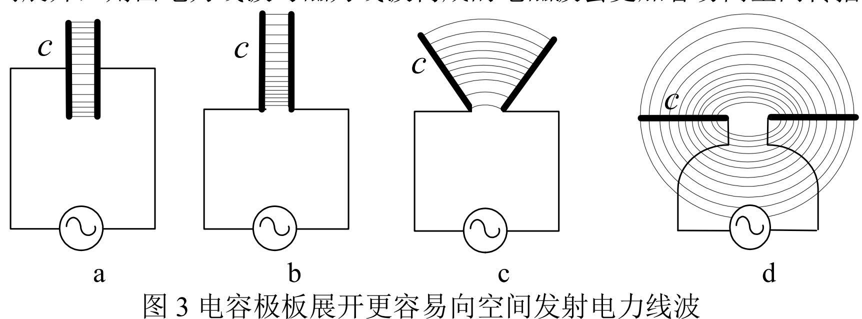


图 3 电容极板展开更容易向空间发射电力线波

Figure 3 Expending plate capacitor to facilitate emission of electric field line waves into space.

基于拓展的洛伦茨力的电磁波与麦克斯韦电磁波的不同在于：1）变化的电流激发的是磁力线；变化的电场（位移电流）既激发电力线同时也激发磁力线。电力线与磁力线各自振动，均以光速传播，构成电磁波。两种力线的振动与传播是由构成这两种力线的介质与加速运动的电荷固有特性决定的，类似于声波在空气中的振动传播，不需要磁场与电场的交替激发。2）磁力线波与电力线波相互垂直，他们的振动方向和波的传播方向与振源电荷振动方向垂直。从两种力线的振动方向与波的传播方向来看，电磁波应属于纵波，但从波的传播方向与振源电荷的振动方向来看，电磁波又应该属于横波。如严格按照波的定义，电磁波既不属于横波也不属于纵波。

3　拓展的洛伦茨力对典型电磁相互作用案例的解释

这里例举几个比较典型的电磁相互作用案例，采用拓展的洛伦茨力观点进行分析、解释。用拓展的洛伦茨力观点分析时，既要清楚实验磁体外围空间磁力线的分布状况，还应该注意磁力线与相互作用的导体之间的相对位置。

3.1 磁体与导电环的相对平动实验

图 4 是磁体与导电环实验示意图。图中 L 为闭合的矩形导电环，环中串接有电流计 G。假设磁体体积较大，矩形导电环面积相比于磁体磁极的面积足够小，两磁极之间的中央部位磁力线可以认为是均匀分布的匀强磁场区。实验过程中的运动为平动，即保持矩形导电环平面与磁力线始终处于垂直状态。

3.1.1 将矩形导电环置于磁极的中央匀强磁场区域（为方便观察，图 4 中导电环画得比例较大）。这时，无论是导电环静止、磁体运动，还是磁体静止、导电环运动，导电环中均没有电流。

解释：两种情况下导电环与磁力线之间都存在相对运动，导电环会切割磁力线。不过被切割的磁力线分成两类，一类是环外的磁力线被某部分导线切割后进入导电环内，另一类是环内的磁力线被另一段导线切割后离开导电环，因为单位时间内被切割的这两类磁力线数量相等，在闭合的导电环回路中感应的电动势大小相等、方向相反，完全抵消，或者说单位时

间内导电环对磁力线的净切割数量为零，所以导电环中感应电动势为零，没有电流产生。

3.1.2 将导电环置于靠近磁体边缘磁场分布不均匀区域。这时无论是磁体静止，导电环作离开或靠近磁体的运动，还是导电环静止，磁体作离开或靠近导电环的运动，导电环中都会产生电流。

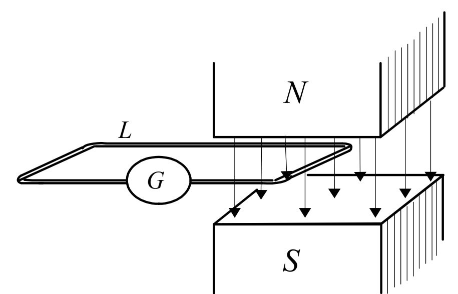


图 4 磁体与导电环相对运动电磁感应示意图

Figure 4 Electromagnetic induction due to the relative motion between a magnet and a rectangular wire-frame

解释：两种情况下导电环与磁力线之间都存在相对运动，导电环会切割磁力线。由于磁力线分布不均匀，单位时间内由环外被切割后进入环内的磁力线数量，与由环内被切割后到环外的磁力线数量不相等，或者说单位时间内导电环净切割磁力线数量不为零，所以导电环中感应电动势不为零，因此会有电流产生。

3.2 变压器

图 5 是变压器结构原理示意图，图中 M 为铁芯。L_1、L_2表示原、副边绕组。大家知道，当变压器的原边绕组L_1接入正弦波交流电压u_1，有正弦波电流i_1流过时，副边绕组L_2中就会感应相同频率的正弦波交流电压u_2。依据（3）、（4）式与前文的分析可知，因为流过电流i_1，线圈L_1的每匝导线外围都会建立环绕自身的磁力线。磁力线方向会随着导线中电流的方向改变而改变，磁力线密度会随着电流的增减而变化，并在垂直于导线的方向上作扩展与收缩振动。振动的磁力线进入被L_1围住的铁芯中，与铁芯中的圆电流相互作用，激励产生附加的磁力线。由于磁力线是闭合线，铁芯磁阻小、具有聚磁性，只要变压器铁芯尺寸合适，没有饱和，则原边绕组和铁芯受激产生的磁力线的扩展与收缩振动就会被限定在铁芯芯柱所确定的范围之内。磁力线的扩展与收缩振动会与绕在芯柱上的其他线圈导线产生相互切割作用。

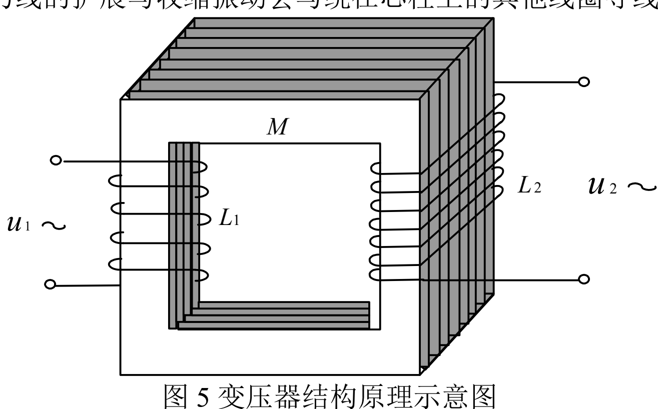


图 5 变压器结构原理示意图

Figure 5 The structure of a transformer

磁力线与原边L_1导线相互切割，在L_1中产生自感电动势。与副边L_2导线相互切割，在L_2中产生互感电动势，实现了变压与电能转换。变压器中磁力线振动传播示意参见图 6，图中细实线表示振动的磁力线。

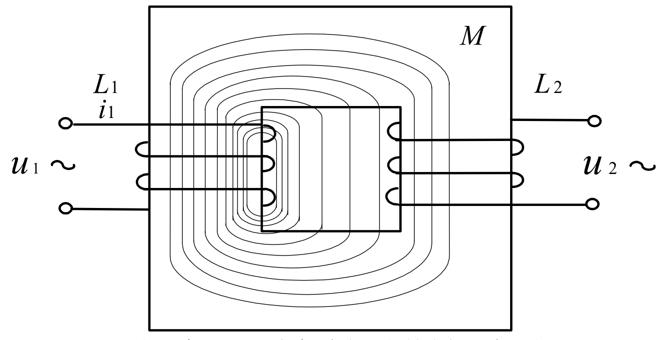


图 6 变压器磁力线振动传播示意图
Figure 6 The vibration and propagation of magnetic field lines of a transformer

3.3 电子感应加速器

将图 5 所示的变压器副边绕组去除，铁芯的截面改为圆形，在L_1绕组所在的铁芯芯柱中部开一个适度的气隙，并将L_1绕组均分成两部分，分绕在气隙上下的铁芯芯柱上。这时该装置就变成了一个交流电磁铁。当线圈L_1中通上正弦波交流电源，有正弦波电流流过时，根据前面的分析可知，气隙中由线圈L_1以及由铁芯中圆电流产生的磁力线会随L_1中电流的变化，在铁芯外缘与中心部位之间进行扩展与收缩振动，磁力线的这种辐线方向的振动可以对进入气隙中的电子进行加速。但是要求电子进入气隙圆周轨道的时刻必须与线圈L_1中的正弦波电流同步，电子实现加速的时间段必须是在正弦波电流每一周期的特定时间段，这个时间段磁力线的方向以及磁力线的运动方向应该是确定的，如磁力线的方向是朝上还是朝下，磁力线的运动方向是向内还是向外。进入气隙中被加速的电子同时承受两种力：一种是电荷在磁场中运动的洛伦茨力；另一种是由于磁力线运动导致电子获得的加速力。这两个力的方向是相互垂直的。（本文如有幸遇到从事电子感应加速器设计与制造的朋友，希望能帮助笔者对上面的分析做一个对错验证实验：将电子感应加速器中电磁铁的励磁线圈由原来的气隙立柱移至另一个立柱，并改变运动电子注入气隙的位置，观察改装后对电子加速效果是否有影响。）

3.4 两根通电直导线之间的作用力

3.4.1 两根相距很近的直导线通有稳恒直流电流

载有稳恒电流的导线周围分布的是静止的磁力线构成的磁场（这里暂不考虑导线中稳恒电流与导线外围静止磁力线建立的暂态过程），两根载流导线会在对方导线建立的磁场中受力，根据左手定则，电流方向相同，两导线相互吸引；电流方向相反，两导线相互排斥。

3.4.2 两根相距很近的直导线通有交流正弦波电流

交流正弦波电流建立的环绕导线的磁力线不是静止的，磁力线会在导线外振动传播，磁力线密度与方向会随导线中电流的变化而变化。导线中的运动电荷同时承受两种力：一种是电荷在磁场中运动产生的洛伦茨力，就是两导线之间相互吸引或排斥的作用力；另一种是导线与运动的磁力线之间的切割产生的作用力，该力的方向沿导线方向，结果是在导线中感应电动势，也就是变压器的感应电动势。至于作用力是吸引力还是排斥力，感应的电动势是减少还是增强了原来导线中的电压，这取决于两导线中电流的相位是同相还是反相。上例两导线稳恒电流的建立必须经过的暂态过程，与这里两导线流过交流电的情况类似。

3.5 不同参照系观察两电荷间相互作用力的问题

这又是一个不同参照系观察电磁感应现象是否对称的例子。假设一匀速运行的列车上有两个与列车相对静止、相隔距离为 r 的正电荷 q1、q2。对于列车上的观察者来说，这两个电荷之间的作用力只有相斥的库伦静电力。但在列车外与铁轨相对静止的观察者看来情况怎么样呢？传统的观点认为两个电荷随列车运动，会产生磁场，因此两电荷之间除了库伦静电力外，还存在电磁相互作用力。电磁力的大小正比于列车相对于铁轨的运行速度。为了权衡两个不同参照系的观察者所谓不同的观察结果，人们需要用相对论效应来加以平衡处理或解释。依照拓展的洛伦茨力观点，静止铁轨参照系中的观察者的确能通过测量仪器测量到随列车运动的电荷产生了磁场，但这是因为测量仪器中的电荷与运行列车上的电荷之间有相对运动导致的，不能因此认为列车上的两个电荷真的产生了磁场和电磁相互作用力。拓展的洛伦茨力的观点认为：只有电场或磁场力导致的电荷运动才能产生磁力线或磁场，而其他方式导致电荷运动是不能产生磁力线或磁场的。这一观点可以避免不同参照系对电磁相互作用观察

出现的不对称现象。这一点其实利用本例就可以加以验证。设想在运行列车上的电荷附近放置一灵敏的指示磁针，列车上的观察者一定观察不到指示磁针有偏转，难道铁轨参照系的观察者能够观测到指示磁针的偏转？所以，电磁相互作用力的性质不会随选择不同参照系的观察而改变。

上面有的例子是教科书上常用来证明法拉第电磁感应定律的。有的例子采用法拉第感应定律并不能给出令人满意的解释，还需要借助洛伦茨力才能给出合理的解释。还有不少例子即使采用法拉第电磁感应定律与其他的观点结合在一起，都无法给出合理的解释。例如单极感应、倜立实验、为验证单极感应问题的四极圆柱形磁体感应实验以及两极球形磁体感应实验等。这些实验案例如采用拓展的洛伦茨力观点，无需其他观点的协助，同样可以很容易给出自然、合理的解释。另外，场和力线的概念是法拉第提出的，拓展的洛伦茨力表明电磁力是磁力线与电荷之间相对运动产生的力，是实体之间的相互作用力。上面的实验与例子分析也说明，与场的概念相比较，力线的概念描述的世界似乎更简单、更接近真实。

4　关于法拉第电磁感应定律与麦克斯韦电磁波

如果接受了磁体的磁力线随磁体运动的观点，再来观察、思考磁体的电磁感应案例就会发现，导体中感应电动势的时刻，未必伴随着磁通量的变化，但一定伴随着某部分导体或导线段与磁力线垂直分量之间的相对切割运动。在为了验证单极感应问题的两极感应与四极感应感应实验中都出现了与法拉第定律完全不符的情况：闭合回路中的正弦波感应电动势幅值（绝对值）随单位时间内磁通量的减小而增大、增大而减小。这一实验结果拓展的洛伦茨力很容易加以解释。实际上利用拓展的洛伦茨力几乎能够自然、合理的解释笔者目前能遇到的所有的电磁感应与电磁相互作用问题。与之相比法拉第电磁感应定律要逊色的多。这导致了一系列疑问的产生：相比于法拉第电磁感应定律，拓展的洛伦茨力是不是更加接近于电磁相互作用的本质？难道麦克斯韦方程组并不十分完美，也存在着瑕疵？如何解释一直以来法拉第电磁感应定律非常实用的事实，并对人类社会发展与进步发挥的巨大作用？麦克斯韦为什么能够依据两个环流定律方程，准确预言出电磁波及其传播速度、以及光就是电磁波的？如何解释两位伟大的科学家取得的巨大成功呢？

首先必须肯定法拉第电磁感应定律已经很接近电磁感应的本质，所以具有很强的实用性。依据法拉第电磁感应定律，人们已经设计、制造出许许多多发电、电动以及各种实用的电气装置，给人类带来了实实在在的好处。这是由于法拉第电磁感应定律与拓展的洛伦茨力的方程在解决实际问题时，基本上是可以互通、相互转换的，运算结果相同。从实用的角度来说，两个定律解决实际问题的效果是一致的，甚至在某些情况下采用法拉第感应定律的运算更加方便。仅从实用的角度来看，法拉第电磁感应定律与拓展的洛伦茨力能够为人们提供的东西并没有什么差别，这或许就是法拉第电磁感应定律成功的主要原因吧。

当年麦克斯韦之所以能够准确预言出电磁波，关键是他分别对两个定律的修正与引申。其一，由于当时安培磁场环流定律应用于平板电容充放电电路时遇到了矛盾。为了消除这一矛盾，麦克斯韦大胆的、创造性的引入了位移电流I_d（变化的电场），得到修正的安培-麦克斯韦磁场环流定律。原磁场环流定律由（4）式变为：

$$2\pi rB = 2\pi k(I + \frac{1}{4\pi K}\frac{\Delta\emptyset_E}{\Delta t}) \qquad (5)$$

式中 K 为库伦定律常数，是一个通过实测决定的常数；I为传导电流；$\frac{\Delta\emptyset_E}{\Delta t}$为电通量变化率；$\frac{1}{4\pi K}\frac{\Delta\emptyset_E}{\Delta t}$就是位移电流$I_d$，也就是电容充放电时两极板间的变化电场。其二，法拉第电磁感应定律的表述为：闭合回路中感应电动势 e 的大小正比于穿过闭合回路的磁通量的变化率。表达式为：

$$e = -\frac{\Delta\emptyset_B}{\Delta t} \qquad (6)$$

式中$\frac{\Delta\emptyset_B}{\Delta t}$为磁通量变化率。对于法拉第电磁感应定律，麦克斯韦引申认为，变化的磁场外围空间存在着涡旋电场 E，不论有没有实际电路存在，电磁感应定律都应该成立，涡旋电场 E 都是存在的。假定真空中磁通量变化范围体积是以中心线为轴的轴对称形状，如果将该体积沿轴的垂直方向剖开，剖面外缘为一圆形。则磁通量变化导致的感应电动势 e 也可以用涡旋电场 E 来表示。因为环绕磁通变化范围体积一周的距离为$2\pi r$，所以$e = 2\pi rE$ 。因此，麦

克斯韦通过对法拉第电磁感应定律的引申，得到法拉第-麦克斯韦电场环流定律，表达式为：

$$2\pi rE = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \tag{7}$$

考虑到一般的情况，环绕传导电流、位移电流或环绕磁通变化范围体积的路径不应仅限于圆形，应可为任意形状。对于平板电容充放电电路，传导电流 I 为零，两个环流定律表达式可分别改写为[5]：

$$\sum B_l l = \frac{1}{c^2}\frac{\Delta\phi_E}{\Delta t} \tag{8}$$

$$\sum E_l l = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \tag{9}$$

式中$B_l l$与$E_l l$分别表示线元 l 的磁场环流和电场环流分量；$\sum$ 表示对整个环路求和；常数$c = \sqrt{\frac{k}{2K}}$，是一个单位为速度的量刚常数。（8）与（9）式的确立，意味着电磁波呼之欲出。（8）式表明随时间变化的时变电场外围空间会激发涡旋磁场；（9）式表明随时间变化的时变磁场外围空间会激发涡旋电场。因为外围空间激发产生的涡旋磁场或涡旋电场是无中生有的，所以也一定是时变场。因此被激发的涡旋磁场外围空间又会再激发涡旋电场，被激发的涡旋电场外围空间又会再激发涡旋磁场，结果必然是磁场与电场的交替激发，向外围空间扩展传播。因此麦克斯韦预言了电磁波的存在。注意到（8）与（9）式两个环流定律方程只有一个量刚常数 c，它的单位正是速度单位，是由实际测量量决定的一个常数，其数值恰好也与当时已知的光速相同。所以，麦克斯韦得出电磁波的传播速度就是光速 c。并且进一步预言 “光（包括热辐射和其他形式的辐射，如果有的话）本身也是一种以波的形式出现的电磁扰动……”。我们今天根据（8）与（9）式两个方程推演得出麦克斯韦当年预言的结论好像十分自然，并不复杂，这是因为我们已知结果。可是在那个年代，能够将安培磁场环流定律加以修正，将法拉第电磁感应定律加以引申，得到（8）与（9）两个方程式，再根据这两个方程式给出一系列伟大预言，非绝顶聪慧之人，是无法做到的。

不过，如今来看由于法拉第电磁感应定律并不是电磁感应的真正原因，其表达式应该算是拓展的洛伦茨力的等值运算式。因此麦克斯韦引申得到方程式（9）也很难做到是完美无缺了。前面的磁体与线圈的电磁感应实验也说明了这一点。笔者这里有两点疑问：1）依照方程式（8）与（9）式，在没有其他导体存在的情况下，空间周期性振动的磁体也应该是电磁波的发射源。可是至今并没有证明有这样的电磁波源存在。依据单极感应验证结论或拓展的洛伦茨力观点，磁体运动可带动磁力线（磁场）运动，但这与在磁场或电场作用下能产生磁场或电磁波的电荷运动并不是等价的。2）麦克斯韦的电磁波是变化的电场与变化的磁场交替激发实现传播的。这意味着在电磁波覆盖范围内的任意点都可以看作是电磁波的发射源，任意一点都在向周围空间发射电磁波。这也意味着在电磁波覆盖范围内，电磁波接收器只要没有被完全屏蔽，其接受应该没有阴影。实际上屏蔽材料或相应的物质很容易造成电磁波和光线的阴影。而拓展的洛伦茨力观点的电磁波，其传播不需要电场、磁场的交替激发，电磁波的传播类似于声波的疏密振动传播，其传播特性是由电磁波传播介质固有特性决定的，在没有其他介质存在的情况下，电磁波由发射源直线单向向外传播的。

尽管存在着不完美，但法拉第电磁感应定律与麦克斯韦方程组因为已经很接近电磁相互作用的本质，因此对推动人类文明进程与科技进步起到了极其巨大的作用。毫无疑问，无论用什么溢美之词赞美这两位伟大的科学家都不为过。

5 结语

笔者已就单极感应问题的验证实验先后撰写过三篇文章。原本以为只要有人认可文章介绍的验证结论，接着追问这一结论意味着什么，再深入思考，也必然会和笔者一样感觉到法拉第电磁感应定律可能存在着不足，产生与笔者相同的想法，因此本篇内容的文章就不用笔者来写了。但三篇文章发出后，并没有得到任何反馈。也许大家对遗留的单极感应问题不感兴趣，也许认为现在都什么年代了，还用一块磁体转转就能研究电磁场，因此不屑一顾。但笔者并不这么认为。众所周知，麦克斯韦方程组虽已经历一百多年，如今并没有过时，还被人们装饰的十分华丽。大家别忘了方程组当时建立的基础条件。虽然麦克斯韦是一位超常智慧的人，但他的方程组与理论并不是凭空产生的。麦克斯韦方程组首先是对前人成果的总结、

归纳，其次是通过引申和修正前人的理论成果，融进自己的伟大思想，得到的两个环流定律方程，导致了麦克斯韦伟大预言的产生。毫无疑问，支撑麦克斯韦方程组的每一个方程都是建立在前人的实验基础之上的。如今就类似单极感应的实验来说，我们普通人所具备的电磁理论基础知识与实验条件虽然无法与科班的电磁领域专家相比，但一定比前辈法拉第他们当年要强得多。因此只要愿意，大家和笔者一样，都有资格和条件研究、验证法拉第与韦伯当年研究的问题，包括他们遗留至今的单极感应问题。其实这些验证实验实施很方便、成本也很低，实验观察结果复现容易。针对验证实验观察结果应该得出怎样的结论，只要大家愿意，都可以介入讨论，给出自己的观点，更容易得出正确的结论。

由于本文同时牵扯到了三位著名的科学大家，因此令笔者很是不安。之所以牵扯，是因为这三位大家的理论都与法拉第电磁感应定律有关。笔者单极感应问题的验证实验得出的结论是磁体会带动磁力线，该结论不仅否定了法拉第在单极感应问题上的观点，也间接的说明法拉第电磁感应定律的不完美。麦克斯韦确信法拉第电磁感应定律，并引申为电场环流定律。爱因斯坦一定确信法拉第-麦克斯韦的电场环流定律，而且该定律对他的狭义相对论思想的形成一定产生了很大的影响，这一点可以从他那篇著名论文开篇就郑重地提出了那个设想的电磁感应实验得以证实。难以想象三位著名科学大家会在同一个电磁感应问题上出现差错。一定是笔者自己的差错。但由于笔者知识有限、也许已钻入牛角尖而不知。希望本文能够有幸遇见热心之人，能够重复笔者的验证实验，帮助笔者指出错误所在，给予批评、批判，笔者将不胜感激。

参考文献：

[1] 阿尔伯特.爱因斯坦. 论动体的电动力学.范岱年、赵中立、许良英编译.
[2] 张学亮. 通过两极球形磁体实验解释单极感应问题.ChinaXiv:2023.00166v2,2023.9.15.
[3] 张学亮. 四极转子磁体感应实验与单极感应问题.ChinaXiv:202303.00166v1,2023.3.16.
[4] 张学亮. 基于单极感应问题的多极感应实验.ChinaXiv：2019.00050,2019.5.8
[5] （美）U.哈伯—沙姆等. 物理 第 3 册[M]. 北京：科学出版社, 1978.09.
[6] 梁宝洪. 普通物理学 第 2 卷 第 2 分册[M]. 北京：人民教育出版社, 1979.

(通讯作者: 张学亮　E-mail: dqxzxl@163.com)

作者贡献声明*：

* 张学亮：提出研究思路、设计研究方案；数据的获取、提供与分析；进行实验；论文起草；论文最终版本修订。